

高炉融着帯近傍における粉体の2次元流動特性の解析

© 1991 ISIJ

論文

柴田耕一朗*・清水 正賢*²・稲葉 晉一*²
高橋礼二郎*³・八木順一郎*³

Two-dimensional Analysis on the Flow Characteristics of Powders around Cohesive Zone in a Blast Furnace

Koichiro SHIBATA, Masakata SHIMIZU, Shin-ichi INABA,
Reijiro TAKAHASHI and Jun-ichiro YAGI

Synopsis:

For clarifying the aerodynamical behavior of unburnt coals in the cohesive zone in a blast furnace with high coal injection rate, two dimensional flow characteristics of powders in packed beds were analyzed by using a mathematical model. Following results were obtained.

(1) Unburnt coals tended to be concentrated at the lower part of cohesive zone. They deposited nearer the wall for reverse-V shaped cohesive zone compared to W shaped cohesive zone.

(2) As a results of the sedimentation of unburnt coals in the furnace, peripheral gas flow was suppressed in reverse-V profile and enhanced in W profile.

(3) Blockade occurred in the lower part of cohesive zone and the shape of cohesive zone affected the pulverized coal injection rate at which blockade occurred.

Key words: ironmaking; blast furnace; pulverized coal injection; cohesive zone; gas-powder two phase flow; distribution of hold up; two-dimensional mathematical model.

1. 緒 言

近年、鉄鉄製造コストの低減を目的に高炉への微粉炭多量吹込みが指向されている。高炉へ微粉炭を多量に吹き込んだ場合、微粉炭の不完全燃焼やコークスの粉化等により多量の粉体が発生する。これらの粉体は、ガスに随伴され高炉充填層内を移動するが、その一部が局所的に滞留した場合、通気性が悪化すると考えられる。このように、微粉炭多量吹込み時の高炉操業において、粉体の局所的な滞留現象は炉内ガス流分布や通気性を支配する重要な因子であるといえる。したがって、高炉への微粉炭多量吹込みを達成するためには、高炉充填層内における粉体の流動性や滞留量分を定量的に把握し、通気性を適正に維持することが重要である。

高炉内では融着帯等の存在により3次元的なガス流れの蛇行現象が生じており、粉体の流動特性は非常に複雑

なものになることが予想される。また、その特性について検討された例^{1)~3)}はごくわずかで、特に、閉塞現象⁴⁾⁵⁾を考慮して解析された研究例は見られない。

前報⁴⁾⁵⁾において筆者らは、鉛直充填層内における固気2相流の1次元的な空気力学的特性を調査するとともに、その特性を表現可能な数学的モデルを構築した。この数学的モデルでは、粉体群の運動抑制力を記述するために(1)粉体群に作用する重力、(2)充填粒子と粉体群との相互作用力(摩擦、衝突)の影響を考慮した付加圧力損失係数 F_k が採用された。そこで得られた F_k の値は鉛直方向の粉体の運動方程式にのみ採用可能で、水平方向の運動方程式には適用できない。本研究では、1次元の水平充填塔を用いて前報⁴⁾⁵⁾と同様の実験を行い、重力の影響を除外した水平方向の付加圧力損失係数 F_k を求めた。そして、数学的モデルを2次元場に拡張し、2次元冷間模型実験によりその妥当性を検討するとともに

平成2年9月本会講演大会にて発表 平成2年9月13日受付 (Received Sep. 13, 1990)

* (株)神戸製鋼所鉄鋼技術研究所 (Iron & Steel Research Laboratories, Kobe Steel, Ltd.)

*² (株)神戸製鋼所鉄鋼技術研究所工博 (Iron & Steel Research Laboratories, Kobe Steel, Ltd., 1-3-18 Wakinocho, Chuo-ku Kobe 651)

*³ 東北大学選鉱製錬研究所 工博 (Research Institute of Mineral Dressing and Metallurgy, Tohoku University)

に、高炉内の層状構造を考慮して融着帯近傍における粉体の流動特性を解析した。

2. 充填層内固気 2 相流の 2 次元数値的モデルの概要

2.1 基礎方程式

1 次元の冷間模型実験に基づいて導出した充填層内固気 2 相流の連続の式および運動方程式⁵⁾を 2 次元場に拡張することにより、次の基礎方程式を得る。なお、これらの基礎方程式は、充填層内空隙単位体積当たりに対して導かれたものである。また、その導出にあたっては、系内は定常で、しかも、空隙は層内で均一に分布していると仮定した。

ガス相

連続の式

$$\operatorname{div}((1-\varepsilon_k)\rho_a\vec{U}_a)=0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

運動方程式

$$\begin{aligned} \operatorname{div}((1-\varepsilon_k)\rho_a\vec{U}_a\vec{U}_a) \\ = -\operatorname{grad}(1-\varepsilon_k)P - (F_{g-b} + F_{g-p}) \quad \dots\dots\dots(2) \end{aligned}$$

粉体相

連続の式

$$\operatorname{div}(\varepsilon_k\rho_p\vec{U}_p)=0 \quad \dots\dots\dots(3)$$

運動方程式

$$\operatorname{div}(\varepsilon_k\rho_p\vec{U}_p\vec{U}_p)=F_{g-p}-F_{p-b} \quad \dots\dots\dots(4)$$

F_{g-b} : ガスと充填粒子間の相互作用力

F_{g-p} : ガスと粉体群との相互作用力

F_{p-b} : 粉体群の運動抑制力

2.2 ガスと充填粒子間の相互作用力 F_{g-b}

F_{g-b} は、粉体の存在に起因するガスの実質流速の変化を考慮した Ergun タイプの流通抵抗式によって、(5)式のように記述した。

$$\begin{aligned} F_{g-b} = 150\mu_a \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon\phi_p d_p} \right)^2 \frac{\vec{U}_a}{\varepsilon(1-\varepsilon_k)} \\ + 1.75\rho_a \left(\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon\phi_p d_p} \right) \frac{|\vec{U}_a|\vec{U}_a}{(\varepsilon(1-\varepsilon_k))^2} \quad \dots\dots\dots(5) \end{aligned}$$

2.3 ガスと粉体群との相互作用力

F_{g-p} は、Newton, Allen および Stokes の抵抗則に従うドラッグ力と粉体の濃度の影響を表す Richardson-Zaki の空間率関数⁶⁾を用いて(6)~(11)式で表現した。

$$\begin{aligned} F_{g-p} = \\ \frac{3C_m\rho_a|\vec{U}_a/(\varepsilon(1-\varepsilon_k))-\vec{U}_p|(\vec{U}_a/(\varepsilon(1-\varepsilon_k))-\vec{U}_p)C}{4\phi_k\rho_p d_k} \quad \dots\dots\dots(6) \end{aligned}$$

ここで

$$C_m = (1-\varepsilon_k)^{-4.7} C_d \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$Re_p < 1.0 \quad C_d = 24.0/Re_p \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$1.0 < Re_p < 10^3 \quad C_d = 24.0(1.0 + 0.15Re_p^{0.69})/Re_p \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$10^3 < Re_p \quad C_d = 0.44 \quad \dots\dots\dots(10)$$

$$Re_p = \phi_k dk |\vec{U}_a/(\varepsilon(1-\varepsilon_k)) - \vec{U}_p| (1-\varepsilon_k)\rho_a/\mu_a \quad \dots\dots\dots(11)$$

2.4 粉体群の運動抑制力 F_{p-b}

粉体群の運動抑制力 F_{p-b} は、粉体自身の重力および粉体と充填粒子との衝突や摩擦によって生じる。ここでは、 F_{p-b} を Fanning タイプの流通抵抗式により(12)式で与えた。

$$F_{p-b} = C |\vec{U}_p| \vec{U}_p F_k / 2D^* \quad \dots\dots\dots(12)$$

付加圧力損失係数 F_k の値を求めるための信頼できる理論式は確立されていない。ここでは、1 次元の冷間模型実験結果をもとに、次の手順にしたがって経験的に F_k の値を求めた。まず、1 次元の充填層内において固気 2 相流は定常かつ一定速度で流動していると仮定した。本仮定下では、ガスおよび粉体の運動方程式において、対流項の影響を無視することができ、(1), (2), (3), (4), (5)および(12)式から(13)式が導出される。

$$\begin{aligned} -d(P(1-\varepsilon_k))/dx &= F_{g-b} + F_{p-b} \\ &= 150\mu_a(1-\varepsilon)^2 U_a / ((\varepsilon\phi_p d_p)^2 \varepsilon(1-\varepsilon_k)) \\ &\quad + 1.75\rho_a(1-\varepsilon) U_a^2 / (\varepsilon\phi_p d_p (\varepsilon(1-\varepsilon_k))^2) \\ &\quad + C U_p^2 F_k / 2D^* \quad \dots\dots\dots(13) \end{aligned}$$

ここで、粉体の速度 U_p は、粉体の供給速度 G と粉滞留量 ε_k を用いて(14)式により与えられる。

$$U_p = G / (\varepsilon \varepsilon_k \rho_p) \quad \dots\dots\dots(14)$$

F_k は、(13), (14)式に実測の圧力勾配 dp/dx と粉滞留量 ε_k を代入することによって計算された。

前報⁵⁾では、ガラス球の鉛直充填層に下部よりガラス粉を吹き込んで、鉛直方向の付加圧力損失係数 F_k の値を決定した。本研究では、前報の装置⁵⁾を水平充填塔に改造して同様の実験を行い、水平方向の F_k の値を求めた。さらに、充填粒子に焼結鉍またはコークス、粉体として燃焼率 85%、径 200 μm の未燃焼微粉炭を用いて F_k の値を求め、ガラス粉とガラス球の組合せの場合と比較した。Table 1 に充填粒子および粉体の物理性状を

Table 1. Physical properties of packed particles and powders.

		Diameter (mm)	Shape factor (—)	Void fraction (—)
Powders	Glass	0.125	0.95	
	Coal dust	0.2	0.83	
Packed particles	Glass	4.8	0.85	0.33
	Sinter	5.0	0.78	0.46
	Coke	4.0	0.81	0.48

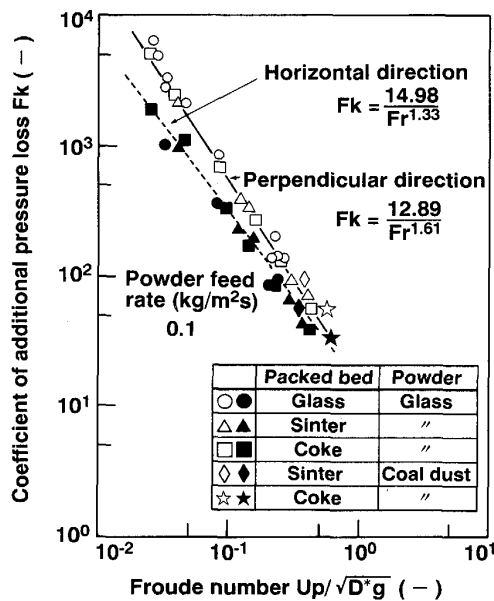


Fig. 1. Relation between Froude number and coefficient of additional pressure loss F_k .

示す。Fig. 1 は、各種の充填粒子と粉体の組合せに対して得られた鉛直および水平方向の抵抗係数 F_k をフルード数で整理した結果である。本実験条件の範囲内では鉛直および水平方向の F_k はおおむね(13), (14)式の関係で整理された。

(鉛直方向)

$$F_k = 12.89 / Fr^{1.61} \quad \dots\dots\dots (15)$$

(水平方向)

$$F_k = 14.98 / Fr^{1.33} \quad \dots\dots\dots (16)$$

また、本関係式は充填粒子や粉体の種類には関わらず同一で、高炉内での未燃焼微粉炭の流動特性の解析にも適用可能であることが示された。

2.5 数値解析プログラムの概要

数値解析プログラムにおいては、PATANKAR らの数値解法⁷⁾にしたがって、上記の基礎方程式をコントロールボリューム法で離散化し、グリッド構成にはスタッガード格子、圧力補正には SIMPLE 法を採用した。

3. 数学的モデルの妥当性の検証

3.1 実験装置

Fig. 2 に実験に使用した2次元冷間模型(平板模型)の概略図を示す。装置は、200 W × 500 H × 50 D mm の透明アクリル性である。スクリーフィーダーにより切り出された粉体は、搬送用の窒素ガスとともに装置内へ吹き込まれる。なお、水平方向の粉体の供給量分布を均一にするため、装置下部のガスおよび粉体供給口にはディストリビューターが設置された。また、装置の上部

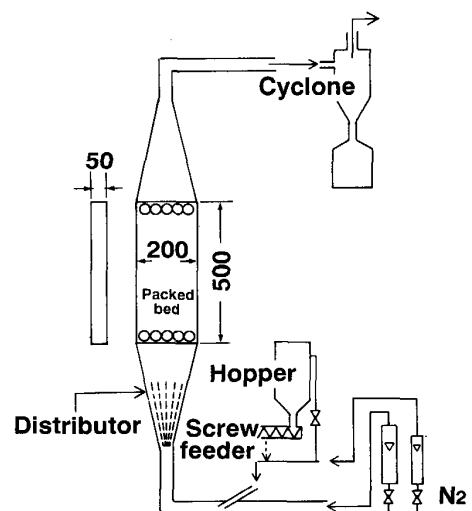
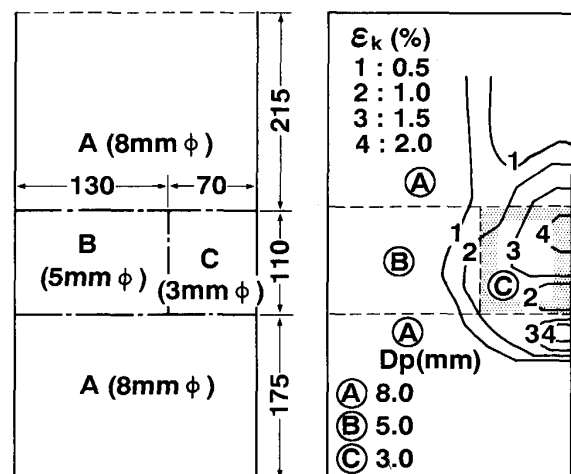


Fig. 2. Experimental apparatus.



Gas flow rate = 0.01 m³/s
Powder feed rate = 0.05 kg/m²s
Powder diameter = 100 μm

a) Structure of packed bed in a cold model b) Distribution of powder hold-up

Fig. 3. Experimental results.

より排出されるガス中の粉体はサイクロンにより捕集される。

3.2 実験方法

本実験において、まず装置内に Fig. 3 a) に示すように 3 mm φ (C 層)、5 mm φ (B 層) および 8 mm φ (A 層) のガラス球を層状に充填し、その後、平均 100 μm φ のガラス粉を充填層下部より吹き込んだ。なお、粉体供給量は 0.05 kg/m²s、窒素ガス流量は 0.01 m³/s (空塔ガス流速 = 1 m/s) に設定した。充填層内の圧力損失が定常に達した後、粉供給および送風を速やかに停止して装

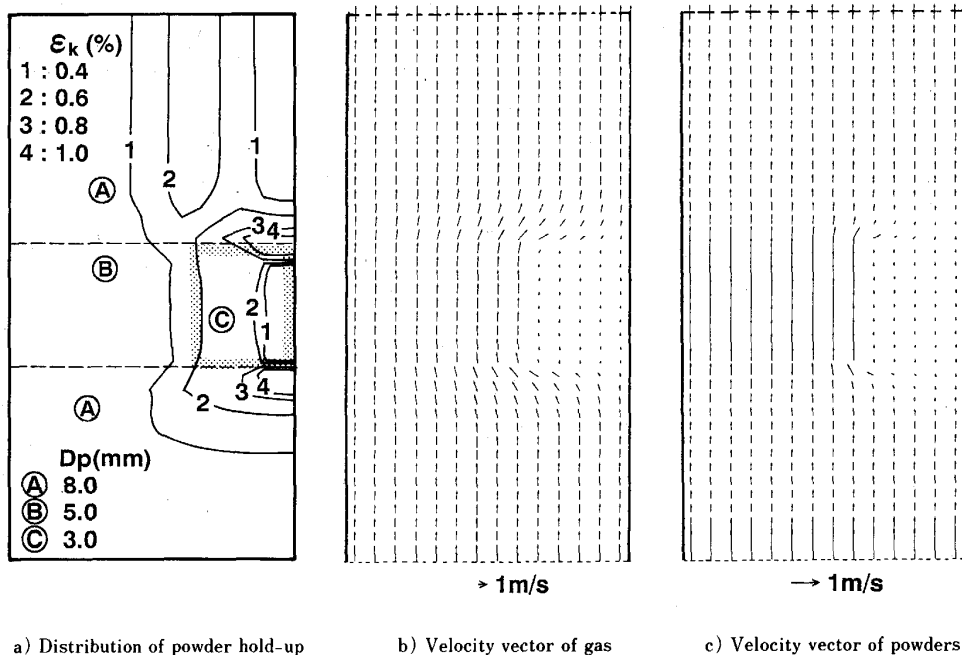


Fig. 4. Computed results.

置内の充填粒子と粉体を吸引サンプリングした。この吸引試料中の粉体を分離、計量することによって粉体の滞留量分布を求めた。

3.3 実験および計算結果

Fig. 3 b) に粉体の滞留量分布 (ϵ_k : 空隙単位体積当たりの粉体占有率) の測定結果を示す。粉体の高濃度滞留域が C 層の上部や下部の A-C 層境界領域に形成されている。また、これらの領域の粉体は非常に遅い速度で常時運動している様子が観察された。

上記の実験条件に対応させて数値計算を行い、2次元数学的モデルの妥当性を検討した。Fig. 4 に計算結果を示す。同図 a) は粉体の滞留量分布を、また、b), c) はそれぞれガスおよび粉体の流速ベクトルを示す。数値計算において座標系はカーテシアン座標を用い、境界条件は流入口で速度が水平方向に均一、壁面では Slip 条件そして流出口では水平方向の速度成分を 0 とした。粉体の滞留量分布の計算値と実測値を比較すると、実測値の ϵ_k が大きくなっており、この原因として静電気力による充填粒子への粉体の付着があげられる。しかし、両者はおおむね一致しており、本数学的モデルの妥当性が確認された。また、Fig. 4 から粉体が高濃度で滞留する領域は、ガス流れの方向が急激に変化し、しかも流速変化が大きい場所に相当していることがわかる。粉体の慣性力はガスに比べて大きく、粉体はガス流れの急激な方向変化に追随できない。このため、A-C 層境界部において粉体がガス流から逸脱し、高濃度滞留域が形成さ

れたものと推察される。

4. 考 察

4.1 高炉融着帯近傍における未燃焼微粉炭の滞留量分布

微粉炭多量吹込み時の高炉操業において、未燃焼微粉炭（以下未燃炭）の局所的な滞留現象は炉内ガス流分布

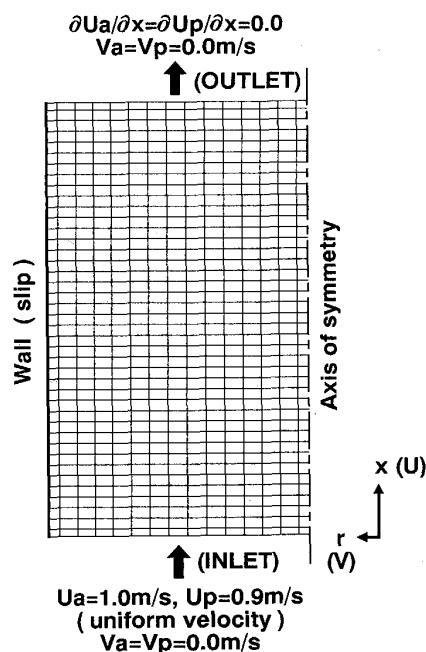


Fig. 5. Boundary conditions.

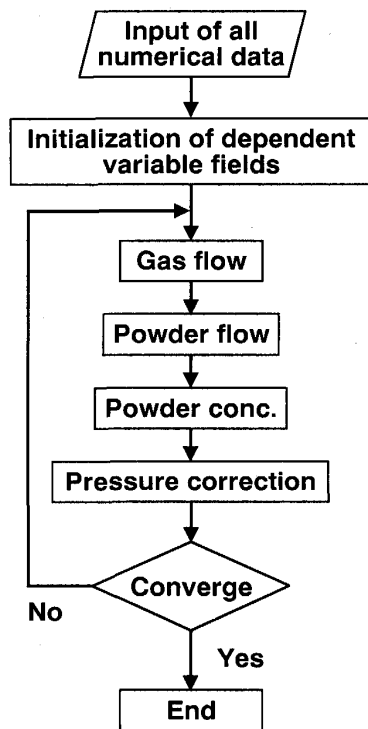


Fig. 6. Flow chart of computation.

や通気性を支配する重要な因子となる。特に、高炉内では、融着帯等の存在により3次元的なガス流れの蛇行現象が生じており、未燃炭の流動特性も非常に複雑であると予想される。微粉炭多量吹込みを達成するためには、高炉内におけるこの未燃炭の複雑な流動特性を正確に把握することが重要と考えられる、ここでは、2次元数学的モデルにより高炉内、特に融着帯近傍における未燃炭の流動特性や滞留現象について検討した。境界条件を Fig. 5 に、また、計算のフローを Fig. 6 に示す。半径 7 m、高さ 20 m の充填層に鉛直下方より粉体およびガスを吹き込んだ。座標系は円柱座標系を用い、軸対称流での解析を行った。

数値計算において設定した前提条件を以下に示す。

- (1) ガスと粉体の流れは、定常である。
- (2) ガスは非圧縮性流体として取り扱う。
- (3) 液滴の存在および化学反応は無視する。
- (4) 等温場である。

一方、高炉内には鉱石、コークスおよび融着層の3層のみが存在すると仮定し、各層の物理性状を Table 2 に示すように決定した。また、同表に粉体の物理性状も示すが、計算対象として取り扱った粉体は $200\ \mu\text{m}\phi$ の未燃焼微粉炭である。粉体の供給量は、微粉炭比を 200 kg/t-p およびレースウェイ内での燃焼率を 85% と仮定し、 $0.015\ \text{kg/m}^2\text{s}$ に設定した。

Table 2. Numerical data for computation.

Ore layer	
Void fraction (—)	0.3
Diameter (mm)	10.0
Coke layer	
Void fraction (—)	0.43
Diameter (mm)	40.0
Cohesive layer	
Void fraction (—)	0.1
Diameter (mm)	10.0
Powder	
Diameter (mm)	0.2
Density (kg/m^3)	700.0
Feed rate ($\text{kg/m}^2\text{s}$)	0.015
Fluid	
Density (kg/m^3)	1.25
Viscosity ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	1.76×10^{-5}

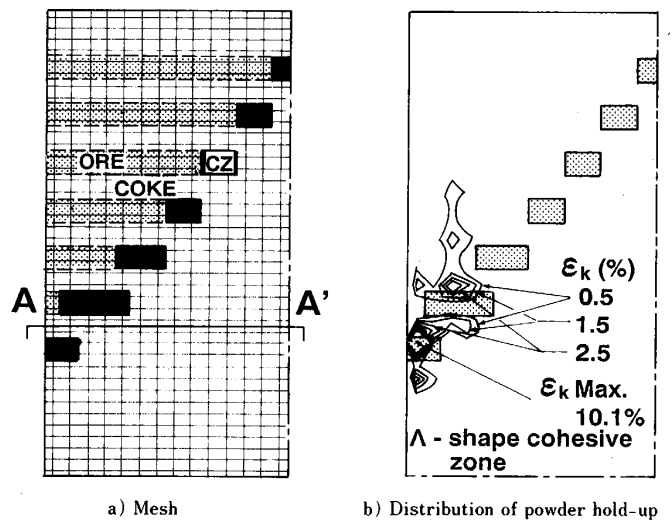


Fig. 7. Computed results for rev.-V shaped cohesive zone.

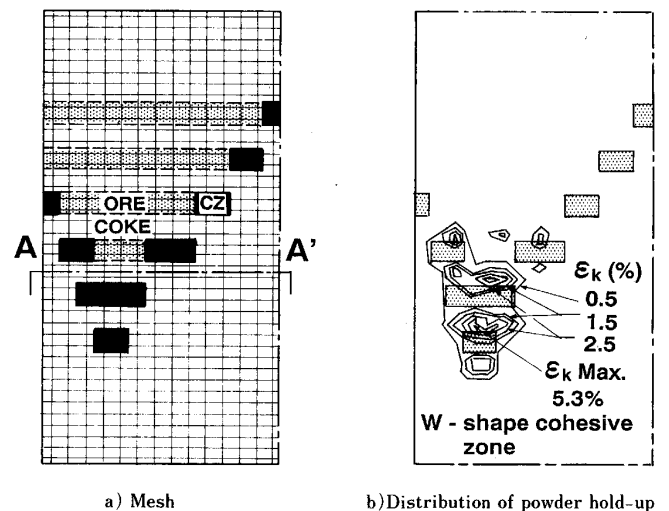


Fig. 8. Computed results for W shaped cohesive zone.

融着帯形状が逆 V 形および W 型の場合の計算結果を Fig. 7, 8 に示す. 同図 a) はメッシュ構成, b) は未燃炭の滞留量分布である. いずれの融着帯形状の場合も, 未燃炭の濃度は融着帯最下端で高い傾向にある. また, 逆 V 型では W 型に比べ, 未燃炭の高濃度領域は炉壁部に近い場所に形成されることが判明した. これらの高濃度域は, 先の模型実験結果と同様, ガス流れの方向が変化し, かつガスの流速変化の大きい場所に対応している.

4.2 未燃焼微粉炭の滞留にともなう炉内ガス流分布の変化

Fig. 9 に未燃炭の滞留にともなう融着帯下端レベル (Fig. 7 a), Fig. 8 a) の A-A' レベル) での炉内ガス流分布の変化を示す. 同図 a) は融着帯形状が逆 V 型, b) は W 型の場合の結果である. 未燃炭の高濃度滞留域をガスが迂回するため, 炉壁部のガス流速は逆 V 型では減少し, 逆に W 型では増加している. これらの結果より, 未燃炭の滞留にともなう, 炉壁流は逆 V 型では抑制され, 一方 W 型では逆に強化されることが明らか

となった.

したがって, 微粉炭多量吹込み時には, 上記のような未燃炭の滞留にともなう炉内ガス流分布および融着帯形状の変化を考慮し, 適切な装入物分布制御を行うことが重要である.

4.3 炉内軸方向の静圧分布に及ぼす未燃焼微粉炭の影響

炉内軸方向の静圧分布に及ぼす未燃炭の影響について検討した結果を Fig. 10 に示す. 未燃炭の滞留により, 圧力損失はいずれの融着帯形状でもわずかに増加する. その増加量は逆 V 型で 0.92 kPa, また W 型では 0.44 kPa である. 逆 V 型の融着帯形状では, W 型に比べ未燃炭が炉壁部に近い場所に滞留するため, 炉内横断面に占める通気性悪化領域の割合が大きい. この結果, 逆 V 型では圧損の増加量が大きくなったものと推察される.

4.4 高炉内での未燃焼微粉炭の滞留現象からみた微粉炭吹込み量の限界

前報⁵⁾において, 閉塞現象について考察し, 閉塞は充

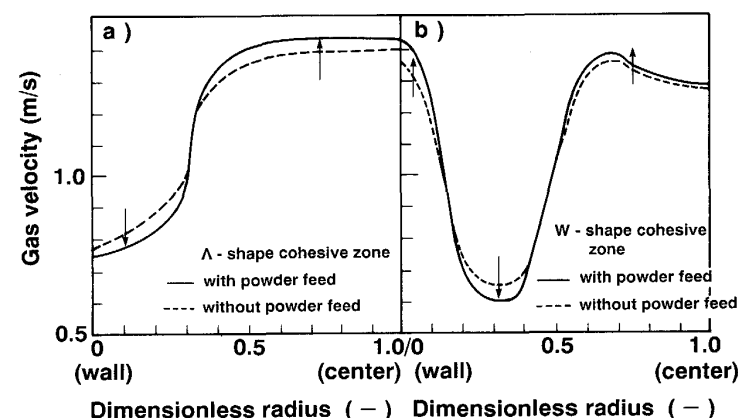


Fig. 9. Influence of powder feed on the radial distribution of gas velocity for different shape of cohesive zone.

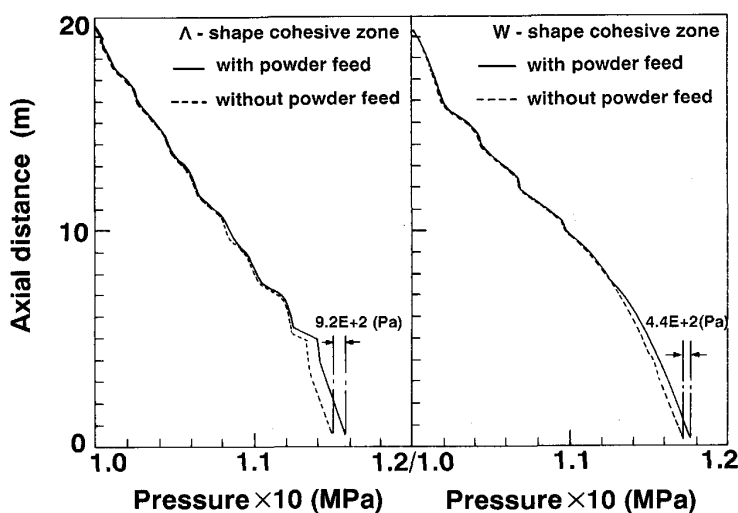


Fig. 10. Influence of powder feed on the longitudinal pressure distribution for different shape of cohesive zone.

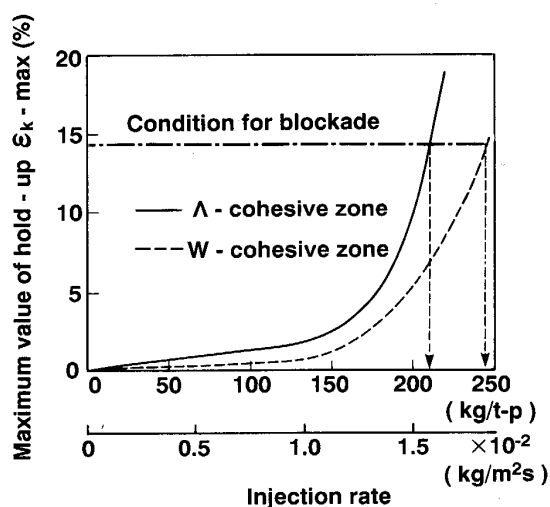


Fig. 11. Relation between injection rate and maximum value of powder hold up.

充填層内の粉体の滞留量が増加し、粉体と充填粒子で形成される充填層の水力学等価直径が粉径の6倍以下になった時に生じることを明らかにした。ここでは、この知見に基づき閉塞の生じない微粉炭吹込み量の限界を推算した。

Fig. 11 に微粉炭吹込み量の増加にともなう炉内での未燃炭の最高滞留濃度 ($\varepsilon_k\text{-max}$) の変化を示す。

なお、計算にあたっては4.1節に示した条件下で粉体の供給量のみを変化させた。融着帯最下端に形成される未燃炭滞留域の最高濃度 ($\varepsilon_k\text{-max}$) は、吹込み量の増大にともなう高くなる。さらに、閉塞の生じない微粉炭吹込み量の限界は、融着帯形状によって異なり、本計算で与えた逆V融着帯形状の場合には210 kg/t-p、また、W型の場合には240 kg/t-pと推算された。

この解析では、微粉炭吹込み量増大にともなうコークスと鉬石の層厚比の変化や未燃焼微粉炭の反応消費等が考慮されておらず、詳細については今後さらに検討していく必要がある。

5. 結 言

充填層内固気2相流の2次元数学的モデルを構築し、平板模型実験によってその妥当性を確認するとともに、数学的モデルを用いて高炉内、特に融着帯近傍における粉体の流動特性を解析した。その結果、以下の結論が得られた。

(1) 充填層内固気2相流の数学的モデルによって、平

板模型内における粉体の2次元な滞留挙動が予測できた。

(2) 粉体は、ガス流れの方向が急激に変化し、しかもガス流速変化の大きい場所に高濃度で滞留する。

(3) 粉体は高炉内で融着帯の最下端近傍に滞留しやすく、また、融着帯形状が逆V型の場合W型に比べ炉壁部に近い場所に粉体の高濃度域が形成される。

(4) 粉体の滞留にともなう、高炉内の炉壁流は逆V型では抑制され、逆にW型では強化される。

(5) 閉塞の生じない微粉炭吹込み量の限界は、融着帯形状によって異なり、本計算で与えた逆V型融着帯形状の場合には210 kg/t-p、また、W型の場合には240 kg/t-pと推算された。

最後に、本計算の遂行にあたりご協力いただいた東北大学選鉱製錬研究所秋山友宏氏に感謝する。

記 号

- C : 充填層空隙単位体積当たりの粉滞留量 (kg/m^2)
- C_d : ドラッグ係数 (—)
- C_m : 修正ドラッグ係数 (—)
- D^* : 充填層内水力学等価直径 (m), $= 2\phi_p d_p \varepsilon / (3(1-\varepsilon))$
- d_k : 粉粒子径 (m)
- d_p : 充填粒子径 (m)
- Fr : フルード数 (—), $= U_p / (D^* g)^{0.5}$
- G : 粉体の供給速度 ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$)
- g : 重力加速度 (m/s^2)
- P : 圧力 (Pa)
- Re_p : 粉径基準の粒子レイノルズ数 (—)
- U_a : ガス空塔速度 (m/s)
- U_p : 粉体の速度 (m/s)
- ε : 充填層空隙率 (—)
- ε_k : 充填層空隙単位体積当たりの粉体占有率 (—)
- μ_a : ガスの粘性係数 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)
- ρ_a : ガスの密度 (kg/m^3)
- ρ_p : 粉体の密度 (kg/m^3)
- ϕ_k : 粉体の形状係数 (—)
- ϕ_p : 充填粒子の形状係数 (—)

文 献

- 1) 山岡秀行: 鉄と鋼, **72** (1986), p. 403
- 2) 山岡秀行: 鉄と鋼, **72** (1986), p. 2194
- 3) 高谷幸司, 山岡秀行, 岩永祐治: 鉄と鋼, **73** (1987), A1
- 4) 柴田耕一郎, 清水正賢, 稲葉晉一, 高橋礼二郎, 八木順一郎: 材料とプロセス, **2** (1989), p. 1020; 鉄と鋼, **77** (1991), p. 236
- 5) 柴田耕一郎, 清水正賢, 稲葉晉一, 高橋礼二郎, 八木順一郎: 学振 54 委-No. 1904 (平成2年7月)
- 6) J. F. RICHARDSON and W. N. ZAKI: Trans. Inst. Chem. Eng., **32** (1954), p. 35
- 7) S. V. PATANKAR and D. B. SPALDING: Int. J. Heat and Mass Transfer, **15** (1972), p. 1787